

光学式変位計による打込み杭の挙動計測

齋藤 二郎 芳賀 孝成
崎本 純治 土屋 幸三郎
近藤 次郎

Measuring Displacements of Driven Piles by Non-contact Electro-optical Displacement Meter

Jiro Saito Takashige Haga
Junji Sakimoto Kozaburo Tsuchiya
Jiro Kondo

Abstract

Pile driving formulae are usually used to estimate the bearing capacity of a driven pile. There have been many pile driving formulae proposed, and recently, one deduced theoretically based on the wave motion theory has come into practical use. In order to utilize such a formula the behavior of a pile needs to be accurately grasped when it is being driven. The authors thus attempted to catch pile movements in the form of waves and measure settlement and rebound precisely by a non-contact electro-optical displacement meter. In this report, an outline of this measuring system and an example of measurements at the job site are described and pile bearing capacities calculated by the results are compared with the results of pile loading tests. As a result of the measurements it was confirmed that the non-contact electro-optical displacement meter is effective for accurately determining settlement and rebound, and for safely grasping the behavior of a pile. Through the pile loading tests it was recognized that the formula deduced from the wave motion theory evaluates bearing capacity most correctly.

概 要

打込み杭の支持力に関する施工管理は、通常、杭打ち式を用いて行なう。この杭打ち式は、数多く提案されているが、最近では、波動理論から理論的に求めた式も実用に供せられるようになってきた。このような杭打ち式を用いるには、杭打込み時の挙動を正確に把握する必要がある。そこで、筆者らは、光学式変位計を用いて杭打込み時の挙動を波形としてとらえるとともに、貫入量とリバウンド量を精度高く測定することを試みた。本文は、この測定システムの概要と現場での測定例について述べ、更に、その測定結果から求めた杭の支持力と鉛直載荷試験結果を比較したものである。測定の結果、光学式変位計を用いた方法は、従来の貼付紙による測定に比べて、貫入量・リバウンド量などを精度良く、しかも、安全に杭の挙動を詳細に把握するために有効な手段であることが確認された。また、鉛直載荷試験の結果、波動理論から導いた杭打ち式が最も適切に支持力を評価していることがわかった。

1. 序

打込み杭の施工管理では、打止めに際して杭打ち式による支持力の確認が重要である。支持力の算定に必要な貫入量とリバウンド量の測定は、一般には、杭体に貼り付けた紙上で各打撃ごとに鉛筆を水平移動させて行なう。しかし、この方法は、杭打込み中に測定員が杭打ち機に近づかなければならぬのできわめて危険であると

ともに、測定員の技術にも個人差があり、海上での杭打ち工事では、杭打ち船の揺れなどによって測定誤差が生じやすい。そこで、杭打ち機から離れて安全に、しかも精度高く杭の貫入量とリバウンド量を測定するために、光学式変位計を用いた測定を行なった。本文は、この測定システムの概要と現場での実測例を紹介したものであり、更に、その測定結果から道路橋示方書に示されている厳密式、同簡略式および Hiley の式を用いて杭の鉛直支

持力を算定し、載荷試験結果との比較も行なっている。

2. 測定概要

2.1. 測定システム

光学式変位計の測定原理は、物体の変位を光学的にとらえ、これを電気的な量に交換して出力するものである。杭打込み時の変位測定システムは図-1に示すように、光学式変位計のカメラ・アンプ、出力装置（ペンレコーダ）および記録装置（データレコーダ）から構成されている。この測定システムによって視準する目標（ターゲット）は、図-1に示すように上下が白い部分と黒い部分に塗り分けたものであり、これを被測定体である杭体に貼り付ける。杭の変位は、ターゲット内の白と黒の境界線をカメラによってとらえ、電気的な変化量として検出される。アンプからの出力は、測定と同時に結果の読取りが可能なペンレコーダに行なう。また、データ保存のために、アンプは記録装置（データレコーダ）にも接続している。

2.2. 測定方法

図-2は杭打込み時の変位記録の波形パターンで、光学式変位計によって測定したものである。キャリブレーション

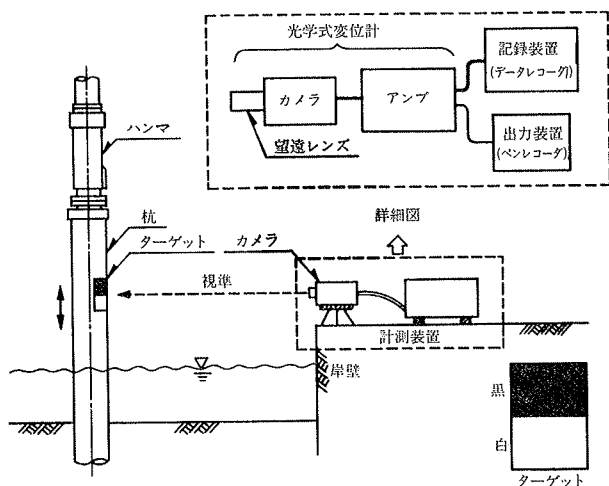


図-1 測定システム

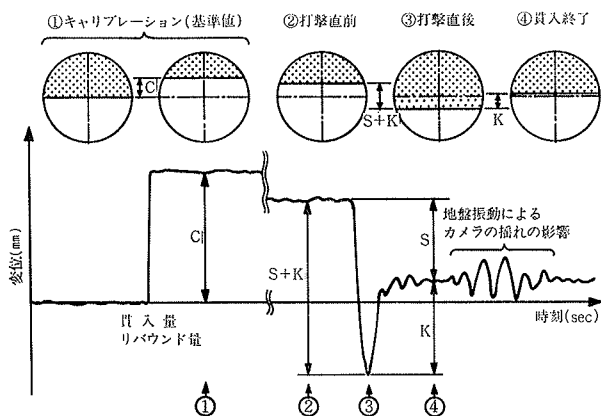


図-2 変位波形パターン

ションは測定に先立って、貫入量・リバウンド量の基準となる変位を記録しておくものであり、杭体に貼り付けたターゲットを白あるいは黒い紙で覆い、境界線を人為的に移動させる。通常は境界線の移動量を 5 cm とし、このときの光学式変位計の出力値（キャリブレーション値：C）を記録しておく。したがって、実際の杭の貫入量（S）・リバウンド量（K）は、出力値とキャリブレーション値との比から求まる。

2.3. 測定記録の特徴

図-3、図-4は、貼付紙および本測定システムによる杭打止め時の測定記録の一例である。図-4から、本測定システムを使用した場合、杭の挙動をかなり詳細に把握できることがわかる。すなわち、本測定システムを用いれば、リバウンド量（K）を杭体の弾性によるリバウンド量（ K_0 ）と先端地盤のリバウンド量（ K_s ）とに分離して測定することが可能となる。

昭和55年に改訂された道路橋示方書（下部構造編）には、杭打止め時の挙動から極限支持力を与える杭打ち式として、波動理論から導いた厳密式とそれの簡略式の2通り示されている。このうち、厳密式では杭の貫入量（S）、杭体の弾性によるリバウンド量（ K_0 ）、先端地盤のリバウンド量（ K_s ）から杭の支持力を求める。貼付紙による方法では、この K_0 と K_s を分離して得ることはできなかった。しかし、本測定システムを用いれば、前述

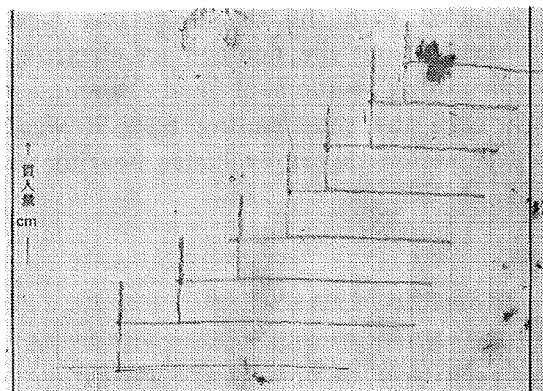


図-3 貼付紙の記録

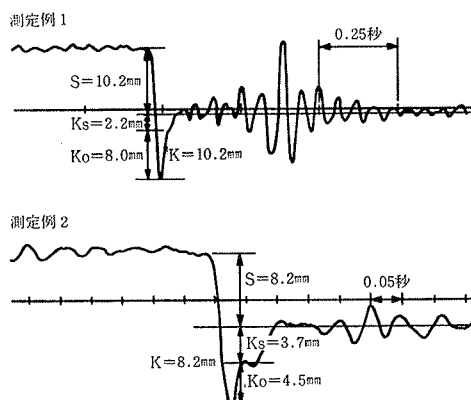


図-4 リバウンド量の分離測定例

したように K_0 と K_s を分離して測定することができるので、杭の支持力の算定式としてこの厳密式を適用することが可能となる。

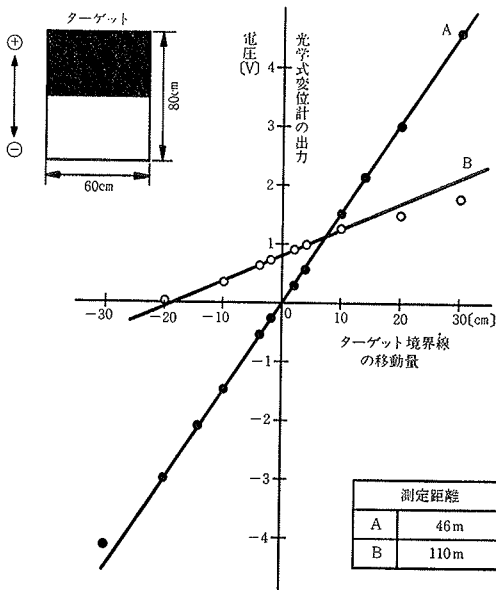
2.4. 測定精度

測定システムを実際に使用するに先立って、当技術研究所内において出力検定を行なった。光学式変位計のカメラには、焦点距離 600 mm の望遠レンズが装備されているが、このカメラのターゲット間の距離（以後、測定距離と呼ぶ）は 46 m および 110 m の 2 ケースとした。そして、ターゲット内にある境界線は、上下方向にそれぞれ 30 cm の範囲内で移動させ、そのときの光学式変位計の出力値を読みとった。図一5はその検定結果をまとめたもので、横軸に境界線の変位量、縦軸に光学式変位計の出力（電圧）をとっている。この図から、境界線の変位量と光学式変位計の出力が直線関係を保っているのは、測定距離が 46 m の場合、上下それぞれ 20 cm であるが、測定距離が 110 m の場合には、かなり狭まって上下それぞれ 10 cm 以内になっていることがわかる。したがって、現場内において杭打ち時の挙動を測定する際、この検定結果を参考にして測定可能範囲を設定し、杭の沈下量がこの範囲を越えるとターゲットの盛替えを行なう必要がある。

なお、測定は日の出から日没まで可能で、途中、急激な光量の変化がない限り、曇天であっても十分満足できる測定精度が確保されていた。

2.5. 地盤振動の影響

杭打込み時にはかなり大きい地盤振動を伴う。そこで、地盤振動のカメラへの影響を調査する目的で、上下方向用の振動計を用いて



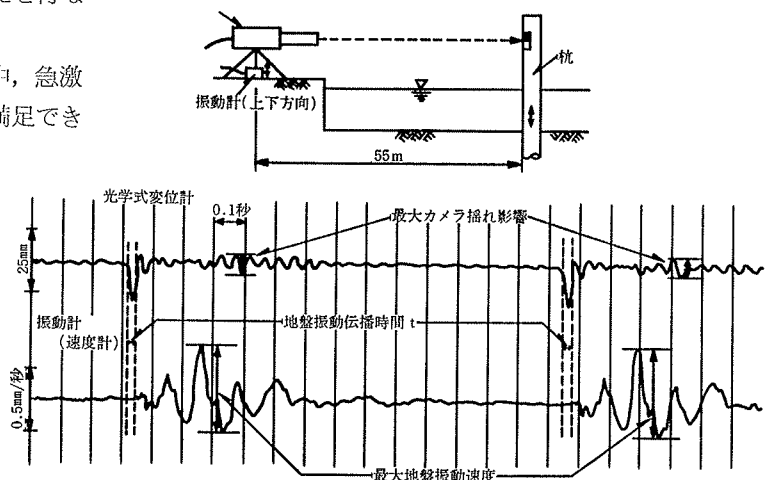
図一5 出力の直線性

カメラ設置点の振動状態を測定した。図一6はその測定結果で、測定距離は 55m である。この図から、地盤振動がカメラ設置点へ伝わるのは、沈下およびリバウンド変形が終了した時点であることがわかる。地盤振動の影響による波形は、次の打撃前にはほとんど消滅している。以上から、測定距離を十分確保すれば、測定結果には地盤振動による影響が入らず、本測定システムが実用に十分供しうることが判明した。図一7はある測定現場における測定記録で、測定距離はそれぞれ 20 m, 30 m, 50 m である。測定距離が 30 m および 50 m の場合には、貫入量・リバウンド量を示す波形と地盤振動の影響による波形は分離しているが、測定距離が 20 m の場合には若干重複している。これらのことから、地盤の硬軟や構成などによって地盤振動の伝播速度の違いはあるが、その影響を避けるためには、測定距離を 30 m 程度確保する必要があるといえよう。

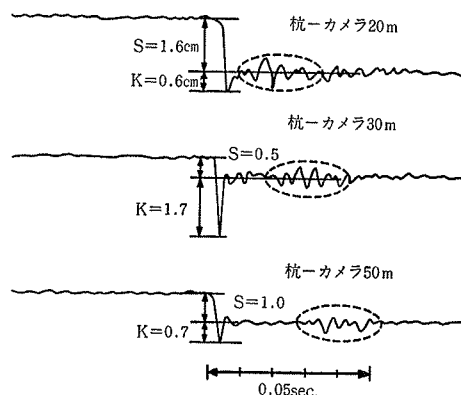
3. 海上での杭打ち工事への適用例

3.1. 杭打ち工事の概要

杭は直径 (ϕ) 1,500 mm, 長さ (L) 40~70 m の海上



図一6 地盤振動の影響



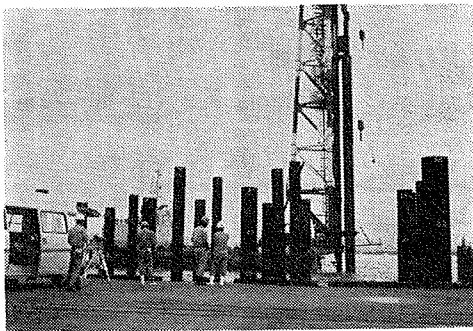
図一7 測定距離と変位記録

打ち鋼管杭である。総打設本数は約 300本で、1本当たりの設計荷重は 700~900ton とかなり大きい。杭の打込みは杭打ち船によって海上で行なわれたが、打止め時の施工管理はとくに入念に行なうよう指示があった。このため、通常行なわれている貼付紙による測定のほか、本測定システムによっても杭止め時の挙動を測定することになった。

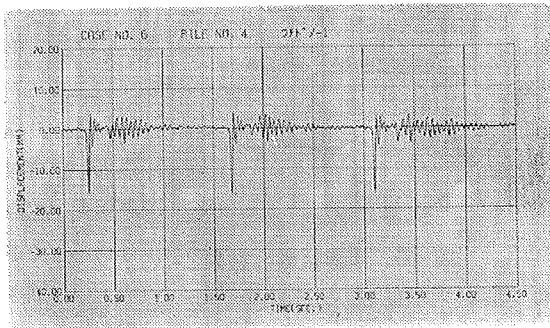
3.2. 測定記録の比較

写真一1は光学式変位計による測定状況を示したものである。測定装置は岸壁上に設置しており、測定距離は 37~68 m である。図一8はその測定結果で、データレコーダの収録値を AD 変換後出力させたものである。この図から、貫入量 0 mm, リバウンド量は 15~16 mm と明確に読みとれる。貫入量については、光学式変位計と同様に岸壁上にレベルを設置して測定していたが、その値もやはり 0 mm を示していた。

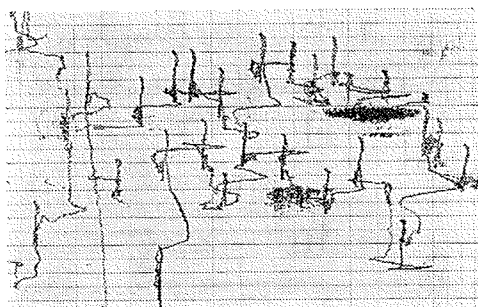
また図一9は同時に実施した貼付紙による測定記録で



写真一1 岸壁からの測定



図一8 光学式変位計による測定記録



図一9 杭打ち船上からの貼付紙による記録

ある。測定結果は、波浪による影響を受け、陸上での記録のような階段状の形状を示さず、非常に判読しづらい。貫入量はレベル測定によってほとんどないという結果が得られているにもかかわらず、あたかも 4~5 mm 程度生じているかのような結果となっている。

4. 杭打ち式と載荷試験結果の比較

杭打込み時の挙動から杭打ち式によって求まる極限支持力と、鉛直載荷試験結果を比較することにより、杭打ち式の妥当性を調べた。試験を実施したのは鋼管杭と PC 杭の 2 本であり、打込み時の挙動は、本測定システムおよび貼付紙によって測定している。図一10は試験実施地点のボーリング柱状図で、地表面から深さ約 4 m まで、 q_u が 0.8~1.0 kg/cm² のローム層、以下砂質粘土層および N 値 50 前後の粘性礫層が続いている。表一1は、杭打止め時の貼付紙と光学式変位計による測定結果で、両者はほぼ同程度の値を示している。

杭打ち記録から極限支持力を求める杭打ち式としては、以下に示すように厳密式〔式(1)〕、道路橋示方書の簡略式〔式(2)〕および Hiley の式〔式(3)〕を用いた。

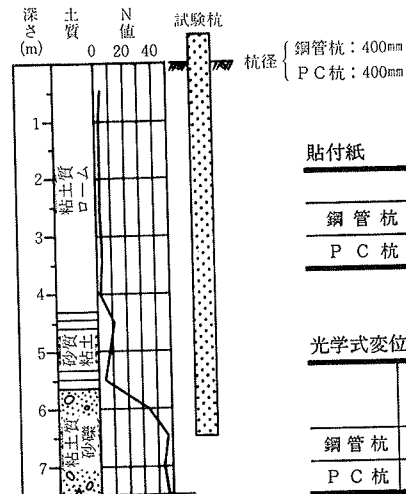
$$R_u = \frac{AE(S + K_s + 2K_0)}{2e_0 l} + \frac{\bar{N}Ul}{e_r} \dots\dots\dots(1)$$

$$R_u = \frac{AEK}{e_0 l} + \frac{\bar{N}Ul}{e_r} \dots\dots\dots(2)$$

$$R_u = \frac{e_h W_H H \left[1 - \frac{W_P}{W_H + W_P} (1 - e^2) \right]}{S + \frac{K}{2}} \dots\dots\dots(3)$$

ここに、

- R_u : 杭の極限支持力
- W_H : ハンマーの重量
- H : ハンマーの落下高
- W_P : 杭の重量
- A : 杭の実断面積
- l : 杭の長さ



貼付紙 (mm)		
	貫入量	リバウンド量
鋼管杭	16	5
PC杭	13	11

光学式変位計 (mm)			
	貫入量	リバウンド量	
		Ko	Ks
鋼管杭	15	4	1
PC杭	15	8	1

図一10 試験現場

表一1 測定結果

- E: 杭のヤング係数 e: 反発係数
- S: 杭の貫入量 e_h: ハンマー効率
- K: 杭のリバウンド量 e₀: 補正係数
- \bar{N} : 杭の周面平均N値 e_r: 補正係数
- U: 杭の周長
- K_s: 杭の先端地盤のリバウンド量
- K₀: 杭体の弾性によるリバウンド量

厳密式は波動理論から導かれたもので、第1項が先端支持力、第2項が周面摩擦力にあたる。簡略式は、(1)式第1項の分子のうち貫入量(S)≒杭の先端地盤のリバウンド量(K_s)としてまとめたものである。表-2は光学式変位計の測定結果を代入して求めた極限支持力の一覧表である。このうち、厳密式と簡略式から求まる先端極限支持力を比較すると、鋼管杭、PC杭ともに厳密式の値は簡略式の約2倍になっている。これは表-1に示すように、S=15mmに対してK_s=1mmであるにもかかわらず、上述のように簡略式ではS=K_sとしているためである。また、Hileyの式による極限支持力は、厳密式の値の1.6倍および3.3倍となっていることがわかる。

		第1項	第2項	合計	載荷試験結果 (ton)
		先端極限支持力 (ton)	周面摩擦力 (ton)	極限支持力 (ton)	
鋼管杭	(1) 厳密式	84	32	116	120
	(2) 簡略式	35	32	67	
	(3) Hileyの式	—	—	387	
PC杭	(1) 厳密式	130	50	180	160
	(2) 簡略式	74	50	124	
	(3) Hileyの式	—	—	283	

表-2 極限支持力

図-11は鉛直載荷試験結果で、いずれも打止め杭特有の全般的破壊の様相を示しており、極限支持力は鋼管杭120 ton、PC杭160 tonである。なお、ここでいう極限支持力とは荷重～沈下量曲線において、わずかな荷重増加に対して大きく沈下し始める点の荷重をさしている。この載荷試験結果を表-2に示した杭打ち式から求めた極限支持力と比較すると、鋼管杭、PC杭とも厳密式で求めた値とよく一致している。簡略式では極限支持力を実際の値より小さく評価しており、Hileyの式では1.8～3.2倍とかなり大きな値を与えている。

したがって、杭打止め時の挙動、とくにリバウンドを杭体の弾性によるものと、杭先端地盤によるものとに分離して測定できるならば、厳密式を適用して極限支持力

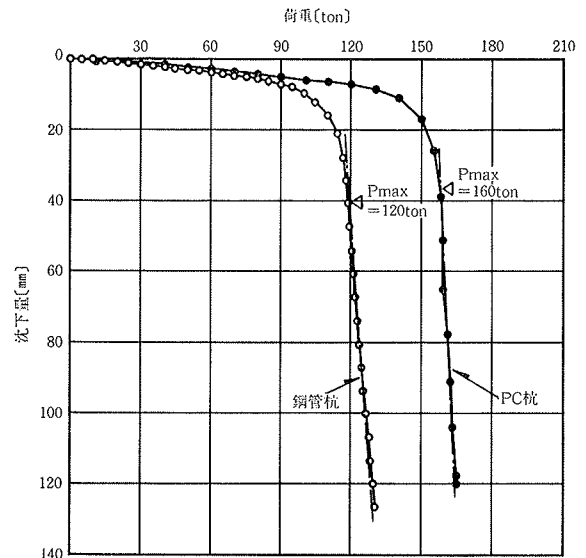


図-11 荷重～沈下量曲線

を求めた方が良いといえる。

5. 結語

光学式変位計を用いた測定システムは、打込み杭の挙動を、従来の貼付紙による方法に比べて安全に、しかも、精度良く測定できるという利点を有している。この測定システムによれば、杭の打込み時の挙動は波形として記録されるので、その波形からK₀とK_sを分離することができ、打込み杭の施工管理に杭打ち式として、波動理論より導いた厳密式も適用できることになる。

このように、当測定システムは、施工管理や杭の打込み時の挙動の解明などに有効な手段であるといえる。今後、多くの現場で測定を実施して、当測定システムの実用化を図るとともに、打込み杭の鉛直載荷試験を合せて実施し、杭打ち式の精度向上に努めていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，IV下部構造編，pp. 360～362
- 2) 近藤，芳賀，土屋：光学式変位計による打込み杭の貫入量とリバウンド量の測定，土木学会第37回年次学術講演会講演概要集，第3部，(昭和57.10)，pp. 499～500
- 3) 斎藤，芳賀，崎本，土屋，近藤：光学式変位計による杭の打込み時の変位測定，第18回土質工学研究発表会講演集，(昭和58.6)，pp. 1025～1026